

CHAPTER 1

第 1 章

绪 论

1.1 运筹学发展简史

运筹学作为一个正式名称的出现是在 20 世纪 30 年代末。当时英美等国为对付德国的空袭，已经从技术上研发出了雷达用于防空系统，但实际运用效果并不理想。为此，一些科学家开始研究如何合理运用雷达系统，以便更好地发挥作用。因为所研究的问题与一般技术问题不同，故称为“运作研究”，英文是“operational research”，后来又改用“operations research”，缩写为 OR^①。当时的运筹学研究主要集中在军事领域，英美等国的军队中成立了一些专门小组，开展相关研究，如研究了护航舰队的编队问题，当船队遭受敌方潜艇攻击时，如何使船队损失减到最少；研究了反潜深水炸弹的合理爆炸深度，使敌方潜艇被摧毁的数量增加了 400%；研究了船只在受敌机攻击时，大船和小船的有效逃避方法，使船只在受敌机攻击时的中弹率由 47% 降到了 29%。由此可见，运筹学早期的应用主要集中于军事方面，研究的问题大多是短期和战术性的。

第二次世界大战后，英美军队相继成立了更正式的运筹学研究组织，但由于所研究的内容多与军事有关而没有公开。到 20 世纪 40 年代末和 50 年代初，其中一些与军事密切相关的内容才逐渐公开出来，莫尔斯 (P. M. Morse) 与金博尔 (G. E. Kimball) 1951 年出版的《运筹学方法》(Methods of Operations Research) 一书即可被认为是那段时期运筹学工作的一个总结。

后来，以兰德公司 (RAND) 为首的一些机构开始利用运筹学方法研究战略性问题、未来武器系统的设计及合理运用方法等。例如，为美国空军评价各种轰炸机系统，讨论未来武器系统和未来战争战略；还研究了苏联的军事能力，分析了苏联政治局计划的行动原则等。20 世纪 50 年代各种洲际导弹相继问世，对于到底发展哪种导弹，运筹学界也参与了争论。兰德公司后来又提出了系统分析 (systems analysis, SA) 的概念和相应技

^① 实际上，运筹学思想和方法的出现可以追溯到更早的时期。例如，军事运筹学中的兰彻斯特 (Lanchester) 战斗方程是在 1914 年提出的；1917 年，排队论的先驱丹麦工程师爱尔朗 (Erlang) 在哥本哈根电话公司研究电话通信系统时，就提出了排队论的一些著名公式；存储论的最优批量公式在 20 世纪 20 年代初就被提出来了；列温逊在 20 世纪 30 年代就已用运筹学思想分析商业广告、顾客心理等。

术方法, 应用开始更偏重于战略方面, 参与了战略力量的构成和数量问题方面的研究。

除了在军事方面的应用研究外, 运筹学和系统分析相继在工业、农业、经济和社会问题等各领域都开始有了应用, 于是经常将这两个名词放在一起, 叫作 SA/OR。与此同时, 运筹数学也有了飞速发展, 形成了运筹学的许多分支。如数学规划(线性规划、非线性规则、整数规划、目标规划、动态规划、随机规划等)、图论与网络、排队论、存储论、对策论、决策论、维修更新理论、搜索论、可靠性和质量管理等。

在运筹学发展的历史上, 线性规划起到了非常重要的作用。作为运筹学最重要的一个分支, 从某种意义上可以说, 正是由于线性规划的提出和成功应用, 才成就了作为应用数学、管理科学、系统工程等学科重要组成部分的运筹学辉煌的今天。线性规划是由丹捷格(G.B.Dantzig)在1947年提出的, 并给出了至今仍被广泛应用的求解线性规划问题的单纯形算法。实际上, 早在1939年苏联学者康托洛维奇(Л.В.Канторович)在解决工业生产的组织和计划问题时, 就已经提出了类似线性规划的模型, 并给出了“解乘法”的求解方法。不过当时他的工作并未受到重视, 直到1960年康托洛维奇再次出版了《最佳资源利用的经济计算》一书后, 他的工作才得到了重视, 并因此获得了诺贝尔经济学奖。还值得一提的是, 丹捷格本人也认为, 线性规划模型的提出受到了列昂惕夫(Wassily Leontief)1932年提出的投入产出模型的影响, 后来列昂惕夫也因为其提出的投入产出模型而获得了诺贝尔经济学奖。线性规划的理论还受到了冯·诺依曼(Von Neumann)的影响。冯·诺依曼和摩根斯坦(O.Morgenstern)在1944年合著的对策论的奠基性著作《对策论与经济行为》一书中, 已隐约指出了对策论与线性规划对偶理论之间的紧密联系。

线性规划理论和方法的问世很快受到了经济学家的重视, 如在第二次世界大战中从事运输模型研究的美国经济学家库普曼斯(T.C.Koopmans)很快看到了线性规划在经济中应用的意义, 并呼吁年轻的经济学家要关注线性规划。库普曼斯在1975年获得了诺贝尔经济学奖。后来, 许多获得过诺贝尔经济学奖的学者, 如阿罗、萨缪尔森、西蒙、多夫曼和胡尔威茨等, 都先后在运筹学的某些领域中发挥过重要作用。

从以上对运筹学发展简史的回顾可见, 为运筹学的建立和发展作出贡献的有物理学家、经济学家、数学家、其他专业的学者、军官和各行业的实际工作者。最早建立运筹学会的国家是英国(1948年), 接着是美国(1952年)、法国(1956年)、日本和印度(1957年)等。我国的运筹学会成立于1980年。1959年, 英、美、法三国发起成立了国际运筹学联合会(IFORS), 各国运筹学会纷纷加入, 我国于1982年加入该会。此外还有一些地区性组织, 如欧洲运筹学协会(EURO)、亚太运筹学协会(APORS)等。

20世纪50年代中期, 钱学森、许国志等教授将运筹学引入我国, 并结合我国的特点开始推广应用。他们在中国科学院力学所建立了运筹室, 在运筹学的多个领域开展研究和应用工作, 其中在经济数学特别是投入产出表的研究和应用方面开展得较早, 在质量控制(后改为质量管理)方面的应用也很有特色。在此期间, 以华罗庚教授为首的一大批数学家加入到运筹学的研究队伍, 使中国在运筹数学的很多分支上很快跟上了当时的国际水平。

运筹学发展的历史表明,推动运筹学在第二次世界大战后迅速发展的因素至少有三个。一是由于“二战”后很多国家在经济发展和企业经营管理方面对运筹学研究和方法的需求,很多科学家进入这个领域,将运筹学研究和方法用于经济和社会发展的众多领域,推动了运筹学的发展。二是运筹数学的快速发展,为运筹学的应用提供了坚实的数学理论,特别是线性规划理论和单纯形方法的提出,极大推动了运筹学研究和方法在很多领域的应用。三是电子计算机的出现和快速发展,以及运筹学算法相关软件包的出现,进一步推动了运筹学的应用。这一作用在进入21世纪后进一步加快,如广泛使用的电子表格软件包Excel已经可以提供解决多种运筹学问题的计算工具,人们可以随时访问使用该软件,使运筹学方法得以迅速普及,发挥出日益重要的作用。

1.2 运筹学的定义和特点

运筹学(operations research),顾名思义,就是对运作过程(operations)进行研究(research),通常用于研究在一个组织内如何运行和协调运作的相关问题。目前,运筹学已广泛应用于制造业、交通运输、建筑、电信、金融规划、医疗保健、军事和公共服务等领域,范围非常广泛。

作为一门应用科学,运筹学至今并没有一个统一的定义。莫尔斯和金博尔对运筹学的定义是:“为决策机构在对其控制下的业务活动进行决策时,提供以数量化为基础的科学方法。”该定义强调运筹学是一种科学方法,即不单是某种研究方法的分散和偶然应用,而是可用于整个一类问题上,并能进行传授和有组织地开展活动。同时,该定义强调运筹学是以量化分析为基础的,必然要用到数学。然而,任何决策都包含定量和定性两方面,而定性方面又不能简单地用数学来表示,如政治、社会等因素,只有综合多种因素的决策才是全面的。所以,运筹学工作者的职责是为决策者提供可以量化方面的分析,指出那些定性的因素。另外也有人认为:“运筹学是一门应用科学,它广泛应用现有的科学技术知识和数学方法,解决实际中提出的专门问题,为决策者选择最优决策提供定量依据。”该定义表明运筹学具有多学科交叉的特点。还有观点认为,运筹学强调帮助组织中的决策者作出“最优”决策,然而由于实践中追求“最优”往往过于理想,故可用“次优”“满意”等来代替“最优”。

不论对运筹学的具体定义有何不同,运筹学具有的下列显著特点可以帮助我们很好地理解什么是运筹学。

1. 用科学的方法进行研究

运筹学英文名称中的“研究”(research)一词意味着运筹学使用的方法类似于在既定科学领域进行研究的方式。运筹学强调用科学的方法来研究所关注的问题。(事实上,管理科学这个术语有时被用作运筹学的同义词。)具体来说,运筹学研究问题的过程是:从仔细观察和设定问题开始,收集所有相关数据;接下来是建立一个科学模型(通常是数学模型),试图抽象出实际问题的本质;然后假设这个模型对实际问题的基本特征有足够精确的表示,

即假设从模型中得到的结论(解)对实际问题是有效的;接下来,进行适当的实验来检验相关假设是否适当,并根据需要进行修改(这个步骤通常被称为模型验证)。因此,从某种意义上说,运筹学涉及对运作过程基本性质的创造性科学研究。当然,运筹学工作过程并不止这些,运筹学研究还会关注组织的实际管理,必须在需要时向决策者提供积极的、可理解的结论。

2. 整体的视角

运筹学的另一个特点是分析视角的整体性。运筹学研究将一个组织视为一个整体,会研究如何以对整个组织最有利的方式来解决组织中各部分之间的利益冲突。因此,运筹学研究中并不必须明确考虑组织的所有方面,而是要寻求与整个组织一致的目标。

3. 寻求最优

运筹学经常试图从所考虑的问题的数学模型中搜索出一个“最优解”(注意我们说的是一个最优解,而不是唯一的最优解,因为可能存在多个最优解)。运筹学工作的目的不是简单地改善现状,而是要帮助管理者确定一个可能的最优行动方案。尽管必须根据管理的实际需要来仔细解释什么是“最优”,但寻求最优的确是运筹学工作的一个重要特征。

4. 多学科的交叉

显然,由于任何一个人都不可能成为运筹学所研究问题的所有方面的专家,这就需要一组具有不同背景和技能的人进行合作。因此,在对一个新问题进行全面的运筹学研究时,通常需要建立一个团队,这个团队通常需要包括在数学、概率和统计学、经济学、工商管理、计算机科学、工程和物理科学、行为科学以及运筹学等特殊技术方面受过专门训练的人,同时还需要团队的成员具备必要的经验和相关技能,从而可以对组织中的各种问题所带来的复杂影响进行恰当的解释。

1.3 运筹学的工作步骤

本书的主要内容是介绍运筹学的数学方法,因为这些定量分析技术构成了运筹学的主要部分。然而,这并不意味着运筹学就是数学。事实上,运筹学工作中的量化分析工作通常可能只占全部工作的一小部分,典型的运筹学工作过程大致可分成以下几个阶段。

1. 明确问题和收集数据

首先要根据解决问题的要求,提出希望实现的目标,分析相关的约束条件、可能的备选行动方案、作出决策的时间,确定相关参数,并收集有关的数据。这一步是定义问题的过程,是整个工作的关键一步,会极大影响研究结论的有用性,因为人们很难从错误的问题界定中寻找到的答案。

同时,应明确运筹学小组的角色定位。运筹学小组通常是以顾问的身份参与决策分析,他们的主要职责是根据管理者的要求,明确需要研究的问题,找出解决问题的方案,并向

管理者（真正的决策者）提出如何解决问题的建议。通常情况下，提交给管理者的报告应包括在不同假设下或某些政策参数的不同范围内，对管理者来说可以考虑的一些具有替代性的方案。管理者对运筹学小组研究的结果和建议进行评估，并在考虑各种其他因素的影响后，根据自己的最佳判断作出最终决定。因此，运筹学小组在整个工作过程中，应该注意和管理层保持一致，包括从管理者的角度识别问题，并为管理者的学习过程提供支持。

运筹学工作过程的第一阶段是要明确问题，特别是要明确需要实现的目标。要做到这一点，首先必须确定管理层的成员都是谁，谁将作出有关的决策，研究并探讨作出决策的人对相关目标的思考。也就是说从一开始就应该让决策者参与到运筹学工作过程中，这对整个工作过程的结果能否得到最终决策者的支持至关重要。

在确定目标时，应该关注整个组织的利益，而不是组织中某一部分的利益，因为运筹学研究要寻求的是对整个组织来说最优的解决方案，而不是只对一部分来说是“最佳”的次优解决方案。因此，解决问题的目标应该是整个组织的目标。当然这样做可能并不容易，因为许多问题可能只涉及组织中的一部分，如果阐述的目标过于笼统，如果目标过多地考虑到对组织中其他部分的副作用，分析将会变得难以处理。因此，在确定研究目标时，应使目标尽可能具体，并应包括决策者的主要目标，且与组织层面的目标保持一致。

那么一个组织的目标通常会包括哪些呢？对营利性组织（企业）来说，一个经常可能的选择是将长期利润最大化作为目标。“长期”一词体现了这一目标的灵活性，因为其中已经考虑到了那些不能立即转化为利润的活动（如研究和开发活动）。这个目标的最大优点是比较具体，便于执行，且包含的范围也足够广泛，涵盖了营利性组织的基本目标，甚至有人认为一个营利性组织的其他所有相关目标都可以转化为长期利润最大化这个目标。

当然在实践中，很多营利性组织不一定会选择长期利润最大化这个目标，管理者可能更倾向于采用满意的利润目标与其他目标的结合，这些其他目标通常可能包括保持稳定的利润、增加（或保持）市场份额、提供的产品多样化、保持稳定的价格、提高员工士气、保持股东对企业的控制以及提高公司声誉等。这些目标的实现可能会有助于长期利润的最大化，但其中的关联关系可能是非常模糊的，也并不方便将这些目标都纳入研究的问题中来。

此外，近年来开始强调企业的社会责任问题，使得企业管理者开始考虑如何履行自身的社会责任，而社会责任显然不同于企业的利润。一般来说，企业需要从五个方面来考虑自身的发展：

- （1）所有者或股东的利益，他们通常希望所有者权益最大化，如利润、股息、股票增值等；
- （2）雇员的利益，他们希望获得合理的工资和稳定的就业机会；
- （3）客户的利益，他们希望以合理的价格获得质量可靠的产品；
- （4）供应商的利益，他们希望企业稳健经营，保持持久的合作关系；
- （5）政府的利益，他们希望能从企业盈利中获得税收且企业的经营符合国家利益。

所有这五个方面对企业来说都应该是重要的，不应重视一方而忽视其他方的利益。因此，在注意到管理层的首要目标是盈利（这一目标的实现实际上最终会使上述五方都受益）

时,也应关注到管理层需要履行的社会责任。

运筹学小组通常还会花费很多精力来收集相关数据,有时可能需要大量的数据来获得对问题的准确理解,并为后续研究中数学模型的建立提供所需要的数据。通常情况下,当研究刚开始时,许多需要的数据可能无法获得,要么是因为信息从未被保存过,要么是因为保存的信息过时或格式错误。因此,可能需要建立一个新的以计算机为基础的管理信息系统,以持续不断地根据需要收集必要的信息。运筹学小组因而需要获得组织中相关部门(如信息技术部门)和人员的帮助,以获得和跟踪所有重要数据。

近年来,随着数据库的广泛使用和数据量的爆炸式增长,一个大数据时代正在到来。运筹学团队有时会发现,他们最大的问题或许已经不是数据太少,而是数据太多了。可能有数千个数据源,数据总量可能以 GB 甚至 TB 为单位。在这种环境中确定特别相关的数据并识别这些数据中有意义的模式就成为一项艰巨的任务。运筹学团队最新的工具之一就是所谓的数据挖掘技术,可以帮助人们在大型数据库中搜索出可能对决策有用的数据模型。

2. 建立数学模型

在定义清楚了决策者希望解决的问题后,下一步工作内容就是将希望达到的目标、需要决策的变量、可能的约束条件、相关的参数等要素之间的关联,用相应的数学公式进行表示,以使用分析的形式来重新描述问题,即建立一个数学模型。在讨论如何建立这样一个模型之前,我们首先探讨一下一般模型特别是数学模型的性质。

模型是对客观现实经过思维抽象后,用文字、图表、符号、关系式以及实体模样来描述的客观对象,常见的例子包括飞机模型、肖像、地球仪等。模型在科学研究和经济管理中发挥着重要作用,如原子模型、遗传结构模型、描述运动或化学反应规律的数学方程、图表、组织结构图和工业会计系统等。这些模型对于抽象出研究问题的本质、显示相互关系和促进分析都是非常重要的。

数学模型也是对现实问题或现象的“理想化”表示,但它们是用数学符号和公式来表示的,像 $F = ma$ 和 $E = mc^2$ 这样的物理定律就是常见的例子。同样,商业问题中的数学模型是由描述商业问题本质的方程和相关数学表达式组成的系统。例如,如果要作出 n 个相关的可量化决策,则它们可表示为**决策变量**(如 x_1, x_2, \dots, x_n),其具体数值有待确定。绩效方面的指标(如利润)可表示为这些决策变量的函数(如 $P=3x_1+5x_2+\dots+6x_n$),这个函数称为**目标函数**。对决策变量取值的任何限制也可用数学公式来表示,通常用不等式或方程(如 $x_1+3x_2+5x_3 \leq 10$)来表示,这种限制通常称为**约束**。约束和目标函数中的常数称为模型的**参数**。于是,通过数学模型所表示的问题就是:如何选择符合约束条件限制的决策变量,使得目标函数值达到最大,这就是一个典型的运筹学模型。

如何对模型中的参数赋值,是模型构建过程中一项关键和极具挑战性的工作。教科书中一般都会直接向学生给出模型中的参数取值,但在解决实际问题的过程中,参数是需要模型的设计者自己根据收集的相关数据进行估计或计算的。由于收集准确的数据往往比较困难,所以对参数的估计或计算往往只是一个粗略的“估计”,而参数的实际值和“估计值”之间通常会存在一定偏差。由于参数的这种不确定性,自然会使人关心当参数值发

生变化时,从模型中求出的解会如何变化,这一过程被称为**敏感性分析**。

此外,在实践中,分析问题的模型可能不止一个,可能需要根据模型的结果不断对模型进行调整,甚至设计新的模型,目的都是获得对所研究问题的越来越好的表示。

数学模型最显著的优点是能更简洁地描述问题,有助于对问题整体结构的理解,有助于揭示重要的因果关系。通过这种表示方式,可以更清楚地表明哪些数据与问题相关,有助于从整体上理解和处理问题,并同时考虑到所有的相互关系。数学模型还可以搭建一个桥梁,使人们能够利用数学技术和计算机来分析问题。

然而,在使用数学模型时要注意避免一些陷阱。由于数学模型是现实问题的抽象化和理想化,并希望使问题易于处理(能够求解),所以通常会进行一些必要的近似或简化的假设,如线性假设、正态分布假设等。因此,必须确保在作出这些近似或简化假设时,该模型仍然是对所研究对象的有效表示。而判断模型有效的恰当标准就是:模型能以足够的准确度预测各个可能的决策方案(也称替代方案、备选方案)的相对效果,从而作出正确的决策,即模型的预测结果与现实世界中实际发生的情况之间具有很高的相关性。为了确定是否满足这一要求,必须对模型进行测试和后期的修改。

在开发模型的过程中,一个好的方法是尽量从简单开始,然后以递进的方式朝更精细的模型发展,使模型不断反映真实问题的复杂性。在不断提升模型复杂性时要进行的基本权衡就是:在模型的精度和可处理性之间作好平衡。

总之,建模过程是运筹学工作中最重要也是最具挑战性的部分,从某种意义上说,尽管需要设计的是一个数学模型,但对建模者的主要要求或许并不是数学知识和工具掌握的多少,而是看他将实际问题转化为数学表示的经验和能力,更多的是一种艺术。实际工作中可以采用的数学模型的形式是多种多样的:可以是随机的,也可以是非随机的;可以是动态的,也可以是静态的;可以是线性的,也可以是非线性的。到底采用何种模型,完全根据研究和解决问题的需要,以及参加决策分析和建模人员的专业背景及对各类模型的熟悉情况,并没有一个统一的标准。一个能够揭示所研究问题本质、描述清楚主要变量及其相关关系、满足解决问题要求的模型就是一个“好模型”。而且,模型不是越复杂越好,也不是考虑的因素越多越好,而是在不失对问题本质及主要量化关系有效把握的前提下,越简单越好。

3. 开发相应计算机程序,根据模型求解问题的解决方案

建立了数学模型后,下一阶段工作就是开发相应的计算机程序,从模型中求出问题的解决方案。一般来看,这是一个相对简单的步骤,因为很多运筹学模型都已经有了标准算法或可应用在计算机上的现成软件包,真正的工作是需要对求出的解进行分析,以及下面介绍的**优化后分析**。

我们知道,运筹学工作的目的是帮助决策者找到相关问题的最佳解决方案。运筹学的很多相关分支已经给出了如何求解问题最优解的方法、计算机程序和相应软件包。但需要明确的是,这些所谓的最佳方案是针对所使用的模型而言的,只是根据所设计的模型得到的所谓“最优解”。由于模型只是实际问题的理想化而不是精确的表示,因此并不能保证根据模型得到的“最佳解决方案”就是实际问题的最佳解决方案。当然,如果模型能被很好地

描述和经过了测试, 那么得到的解决方案应该是实际问题中理想方案的一个很好近似。

已故著名管理学家赫伯特·西蒙指出: “**在实践中, 满意解比最优解更为普遍。**” 西蒙认为, 管理者具有寻求问题“足够好”的解决方案的倾向。与其试图制定一个全面的绩效衡量标准, 以最佳地协调各种理想目标之间的冲突, 不如采用更务实的态度: 可以根据过去的绩效水平或竞争对手取得的成绩设定目标, 确定各个领域的最低满意绩效水平, 这就是“满意”的本质。

最优与满意的区别反映了理论与现实的差异, 在实践中尝试实现某一理论时经常会面临现实的约束, 用一位英国先驱者塞缪尔·艾伦的话来说: “**最优是终极的科学, 满意是可行的艺术。**”

运筹学试图将尽可能多的科学分析引入决策过程。然而, 成功的运筹学工作者会认识到, 决策者在合理时间内获得令人满意的行动指南是第一需求。因此, 尽管运筹学研究的目标应该是追求最优, 同时还应考虑研究的成本和延迟完成研究的不利影响, 使研究产生的净效益最大化。在认识到这一点后, 运筹学团队可能会只使用启发式程序(即根据直觉设计的程序, 不能保证获得最优解)来找到一个好的次优解。当为建立问题的适当模型和找到最佳解决方案所需的时间或成本非常高时, 这种情况十分常见。近年来, 在高效的元启发式算法方面已经取得了很大进展, 为设计适合特定问题的启发式程序提供了一个通用结构和策略指导。

以上论述表明, 运筹学研究实质上只是为了寻求一个好的解决方案, 这个方案可能是最佳的, 也可能不是最佳的。根据原始模型求出的最优解可能远远不适合实际问题, 因此需要进行进一步的分析, 即所谓的**优化后分析**, 也被称为假设分析, 因为它需要回答最优解会发生什么问题, 并对未来的条件作出不同假设。这些问题通常是由作出最终决策的管理者提出的, 而不是由运筹学团队提出的。电子表格软件的出现, 使得电子表格在进行优化后分析时可以发挥重要作用。电子表格的一大优点是, 任何人都可以轻松地交互使用, 以查看对模型进行更改时最优解决方案发生了什么变化, 这个实验式的交互过程非常有助于管理者理解模型, 并增加对模型有效性的信心。

优化后分析包括了**敏感性分析**。敏感性分析有助于确定模型中哪些参数在确定解决方案时最为关键(称为敏感参数)。**敏感参数是指模型中那些发生改变后可以导致模型结果发生改变的参数**。在给一个敏感参数赋值时需要格外谨慎, 要注意更精确地估计这类参数, 或者至少估计其可能取值的范围。然后, 在寻求解决方案时, 应尽量使在敏感参数的各种可能取值下, 该方案仍然是一个好的解决方案。除了敏感性分析外, 优化后分析还包括下面将提到的模型验证, 以及提出一系列相应解决方案, 这些解决方案包括一系列对理想行动方案改进。

4. 模型验证

开发数学模型类似于开发一个大型计算机程序。当第一个版本完成时, 不可避免地存在许多错误, 必须经过彻底测试, 尽可能多地发现并纠正错误。最终, 在一系列改进之后, 使当前的程序给出合理有效的结果。尽管一些小错误仍然存在(而且可能永远不会被检测到), 但主要错误已被消除, 程序可以可靠地使用了。同样, 数学模型的第一个版本不可避

免地包含许多缺陷：一些相关因素或相互关系没有被纳入模型，一些参数也没有得到正确的估计，这是不可避免的。因此在使用模型之前，必须对其进行测试，以尽可能多地发现和纠正缺陷。最终，使当前的模型可以给出合理有效的结果，尽管一些小的缺陷仍然存在。测试和改进模型以提高其有效性的过程被称为**模型验证**。

由于运筹学团队可能会花费很多时间和精力来开发模型的细节部分，容易出现“只见树木不见森林”的情况。因此，在完成了模型初始版本后，开始模型验证的有效方法就是重新审视整个模型，检查是否存在明显错误或疏忽。进行审查时，最好在运筹学小组中包括至少一名没有参与模型设计的人。需要重新审视问题的定义，并将其与模型进行比较，可能会有助于揭示错误。有时，通过改变参数和/或决策变量的值并检查模型的输出是否合理，可以有效地洞察模型。

更系统的测试模型的方法是采用回顾性测试，即使用历史数据重现过去，然后确定：如果使用模型和其结果给出的解决方案，结果会有多好，即使用此模型是否会比当前的实践产生显著的改进。这样的比较还可以指出模型存在缺陷和需要修改的地方。此外，通过使用模型中的替代解决方案并估计其假设的历史表现，可以收集大量的证据，说明模型如何很好地预测了替代行动方案的相对效果。不过，回顾性测试的一个缺点是，它使用了设计模型时使用的相同数据，而关键的问题是过去是否能代表未来，如果不是这样的话，那么这个模型在未来的表现可能与过去完全不同。

5. 做好应用准备

测试阶段完成后，如果模型未来要被重复使用，就需要制作一个文档系统，以便按照管理层的规定应用模型。该文档系统应包括模型描述、求解程序（包括优化后分析）、实施的操作程序等。这样，即使发生了人员变动，系统也可以被规范地调用。该文档系统通常是基于计算机的。此外，可能有大量的计算机程序需要使用和集成。数据库和管理信息系统可以在每次使用模型时为模型提供最新的输入，在这种情况下需要接口程序。对模型应用求解过程后，其他计算机程序会自动触发结果的实现。在有些情况下，可以建立一个交互式的基于计算机的系统，称为决策支持系统，帮助管理者根据需要使用数据和模型来支持他们的决策。

6. 实施

运筹学工作的最后阶段就是要按照管理层的要求进行实施，这是一个关键阶段，因为正是在这个阶段，运筹学研究的好处才会得以收获。因此，运筹学小组参与此阶段是非常重要的，确保模型解决方案准确地转化为组织的操作程序，并及时纠正解决方案中可能出现的任何缺陷。

实施阶段的成功很大程度上取决于最高管理层和运营管理层的支持。如果运筹学团队在整个研究过程中能让管理层充分了解情况，并鼓励管理层积极指导，那么就更有可能会获得这种支持。良好的沟通有助于确保研究工作实现管理层的要求，也使管理层对运筹学研究有更高的主人翁意识，从而鼓励他们支持研究结果的实施。

实施阶段包括以下几个步骤。首先, 运筹学小组要向运营管理层详细解释将采用的新系统以及它与运营现实的关系。接下来, 由这两方面共同负责制定该系统投入运行时所需要的程序。最后, 运营管理层会对相关人员进行详细培训, 并启动新的运行方案。如果成功的话, 新系统可能会在未来使用多年。考虑到这一点, 运筹学团队在初始阶段应进行监控, 获得经验, 并确定将来应进行的任何可能的修改。在整个新系统使用期间, 重要的是继续获得有关系统工作情况以及模型假设是否得到了满意的反馈。当与原始假设发生重大偏差时, 应重新检查模型, 以确定是否应对系统进行修改。

在一项研究工作达到终点时, 运筹学小组应清楚、准确地将全部过程特别是有关方法用文档记录下来, 从而使其工作具有可复制性。可复制性应该是运筹学研究人员职业道德规范的重要组成部分, 在从事一些可能引发争议的公共政策问题研究时, 这一点尤为关键。

1.4 运筹学的应用

在介绍运筹学发展简史时, 已经提到了运筹学早期的一些应用, 主要集中在军事领域。第二次世界大战后, 运筹学的应用开始转向民用, 下面是运筹学应用的一些传统领域。

(1) 市场销售。主要应用在广告预算和媒介的选择、竞争性定价、新产品开发、销售计划的制订等方面。如美国杜邦公司在 20 世纪 50 年代起就非常重视将运筹学用于广告、产品定价和新产品的引入; 通用电力公司运用运筹学对某些市场进行了模拟研究。

(2) 生产计划。在总体计划方面主要用于总体上确定生产、存储和劳动力的配合, 以适应波动的需求, 方法包括线性规划和模拟方法等。如巴基斯坦某重型机械制造厂用线性规划安排生产计划, 节省 10% 的生产费用。相关应用还包括生产作业计划、日程表的编排等; 此外还有在合理下料、配料问题、物料管理等方面的应用。

(3) 库存管理。主要应用于多种物资库存量的管理, 确定某些设备的能力或容量, 如停车场的大小、新增发电设备的容量大小、电子计算机的内存量、合理的水库容量等。美国某机器制造公司应用存储论后, 节省 18% 的费用。目前国外的新动向是将库存理论与计算机物资管理信息系统相结合。如美国西电公司, 从 1971 年起用 5 年时间建立了“西电物资管理系统”, 为公司节省了大量物资存储费用和运费, 而且减少了管理人员。

(4) 运输问题。这方面的应用涉及空运、水运、公路运输、铁路运输、管道运输、厂内运输。空运问题涉及飞行航班和飞行机组人员服务时间安排等。在国际运筹学协会中设有航空组, 专门研究航空运输中的运筹学问题。水运方面的应用有船舶航运计划、港口装卸设备的配置和船到港后的运行安排。公路运输应用方面除了汽车调度计划外, 还有公路网的设计和分析, 市内公共汽车路线的选择和行车时刻表的安排, 出租车的调度和停车场的设立。铁路运输方面的应用就更多了。

(5) 财政和会计。这方面的应用涉及预算、贷款、成本分析、定价、投资、证券管理、现金管理等, 采用的方法包括统计分析、数学规划、决策分析, 此外还有盈亏分析法、价值分析法等。

(6) 人事管理。这方面应用涉及六个方面, 第一是人员的获得和需求估计; 第二是人

才开发,即如何进行教育和训练;第三是人员分配,主要是各种指派问题;第四是各类人员的合理利用问题;第五是人才评价,例如如何测定一个人对组织、社会的贡献;第六是工资和津贴的确定等。

(7) 设备维修、更新和可靠性,项目选择和评价。

(8) 工程的优化设计。在建筑、电子、光学、机械和化工等领域都有应用。

(9) 计算机和信息系统。可将运筹学方法用于计算机的内存分配,研究不同排队规则对磁盘工作性能的影响。有人利用整数规划寻找满足一组需求文件的寻找次序,利用图论、数学规划等方法研究计算机信息系统的自动设计。

(10) 城市管理。这方面应用有各种紧急服务系统的设计和运用,如救火站、救护车、警车等分布点的设立。美国曾用排队论方法来确定纽约市紧急电话站的值班人数。加拿大曾研究过一座城市的警车的配置和负责范围,出事故后警车应走的路线等。此外,还有城市垃圾的清扫、搬运和处理;城市供水和污水处理系统的规划。

值得指出的是,近年来运筹学应用又开拓了很多新方向。例如存储论的应用已经从车间、工厂规模转向从用户、零售、批发、中间运输一直到工厂生产供应所形成的供应链的设计、管理和应用。在武器和大型装置方面已经不单是研究其运用方面,更转向设计和规划等。此外,在银行、医院、经济、运输、信息系统、电子商务和电子政务等领域也都有了很多新的应用。

为说明运筹学应用领域的广泛,我们用获得过美国运筹学和管理学学会(INFORMS)颁发的弗兰兹·厄德曼奖(Franz Edelman Award)的例子来为读者提供参考。厄德曼奖是由世界著名的运筹和管理科学家厄德曼(F. Edelman)于1971年创立的。这个奖每年评一次,先评出一批候选奖,然后选出5~6名提名奖,最后从中评出一个最佳奖。厄德曼奖的评选原则包括对运筹学和管理科学理论和方法的创新、应用工作对企业创造的直接经济效益,以及对社会和人类生活所作的积极贡献等。例如,2002年有30多个项目进入了初评,经过严格筛选后,法国标致汽车公司、美国糖果制造巨商玛氏公司、美国大陆航空公司、德国Rhenania Catalog House、美国迅达电梯公司,以及美国先正达农业企业得到提名,进入最终决赛。在这六个项目的激烈角逐后,由华人学者于刚教授领导的项目小组由于在大陆航空公司等民用航空企业所创造出的经济效益和对社会及人们生活作出的贡献,成为2002年度厄德曼奖的获得者。

我国运筹学的应用是在1957年始于建筑业和纺织业。在理论联系实际的思想指导下,从1958年开始在交通运输、工业、农业、水利建设、邮电等方面都有应用。尤其是在运输方面,从物资调运、装卸到调度等。例如在为解决合理粮食调运问题方面,我国的运筹学工作者提出了“图上作业法”,并从理论上证明了它的科学性。在解决邮递员合理投递路线问题时,我国的管梅谷教授提出了“中国邮路问题”的解法。在工业生产中,推广了合理下料、机床负荷最优分配等方法。在纺织业中,用排队论方法解决了细纱车间劳动组织、最优折布长度等问题。在农业中,研究了作业布局、劳力分配和麦场设置等。20世纪60年代起,我国运筹学工作者还在钢铁和石油部门开展了较全面和深入的应用,如投入产出法在

钢铁部门的应用。1965年起, 统筹法应用在建筑业、大型设备维修计划等方面取得可喜成果。1970年起, 全国大部分省、市和部门推广了优选法, 应用范围包括配方和配比的选择、生产工艺条件的选择、工艺参数的确定、工程设计参数的选择、仪器仪表的调试等。20世纪70年代中期, 最优化方法在工程设计界得到了广泛重视, 在光学设计、船舶设计、飞机设计、变压器设计、电子线路设计、建筑结构设计和化工过程设计等方面都有运筹学应用的成果。排队论也从20世纪70年代中期开始应用于矿山、港口、电信和计算机的设计等方面; 图论用于线路布置和计算机设计、化学物品的存放等; 存储论虽然在我国应用起步较晚, 也于20世纪70年代末在汽车工业和其他部门中取得成功。近年来运筹学的应用已趋向研究规模大而复杂的问题, 如部门计划、区域经济规划等, 并已与系统工程难以分解。

1.5 运筹学发展展望

关于运筹学将往哪个方向发展, 从20世纪70年代起运筹学工作者就产生了种种观点, 至今仍在争论, 我们下面列举一些观点。美国运筹学会前主席邦特(S. Bonder)认为, 运筹学应在三个领域发展: 运筹学应用、运筹科学和运筹数学, 并强调发展前两者, 从整体上应协调发展。事实上运筹数学到20世纪70年代已形成一系列强有力的分支, 数学描述相当完善, 这是一件好事。正是这一点使不少运筹学界的前辈认为, 有些专家钻进运筹数学的“象牙塔”, 而忘掉了运筹学的原有特色和初衷, 忽略了多学科的横向交叉和解决实际问题的需要。

近几年来出现的一些批评意见认为, 有些人只迷恋于数学模型的精巧、复杂化, 使用高深的数学工具, 而不善于处理大量新的不易解决的实际问题。现代运筹学工作者面临的大量新问题是经济、技术、社会、生态和政治等因素交叉在一起的复杂系统。因此, 从20世纪70年代末至20世纪80年代初, 不少运筹学家提出: 要注意研究大系统, 注意与系统分析相结合。美国科学院国际开发署写了一本书, 其书名就把系统分析和运筹学并列。有的运筹学家提出了“从运筹学到系统分析”的观点。由于研究新问题的时间范围很长, 必须与未来学紧密结合。由于面临的问题很多涉及技术、经济、社会、心理等综合因素的研究, 在运筹学中除常用的数学方法以外, 还需要引入一些非数学的方法和理论。

曾在20世纪50年代写过《运筹学数学方法》一书的运筹学家沙旦(T.L. Saaty), 在20世纪70年代末提出了层次分析法(AHP)。他认为过去过分强调细巧的数学模型, 可是很难解决那些非结构性的复杂问题。因此宁可用看起来较简单粗糙的方法, 加上决策者的正确判断, 却能解决实际问题。切克兰特(P.B. Checkland)把传统的运筹学方法称为硬系统思考, 它适用于解决那种结构明确的系统以及战术和技术性问题, 而对于结构不明确的、有人参与活动的系统就不太胜任了。这就需要采用软系统思考方法, 相应的一些概念和方法都应有所变化, 如将过分理想化的“最优解”换成“满意解”。过去把求得的“解”看作精确的、不能变的凝固的东西, 而现在要以“易变性”的理念看待所得到的“解”, 以适应系统的不断变化。解决问题的过程是决策者和分析者发挥其创造性的过程, 这就是进入20世纪70年代以来人们愈来愈对人机对话的算法感兴趣的原因。

在 20 世纪 80 年代一些重要的与运筹学有关的国际会议中, 很多人提出决策支持系统是运筹学发展的一个好机会。进入 20 世纪 90 年代和 21 世纪初期, 产生了两个重要趋势。一个趋势是软运筹学的崛起, 主要发源地是英国。1989 年英国运筹学学会开了一个会, 后来由罗森汉特 (J.Rosenhead) 主编了一本论文集, 被称为软运筹学的“圣经”, 里面提到了不少新的属于软运筹的方法, 如软系统方法论 (SSM)、战略假设表面化与检验 (SAST)、战略选择 (SC)、问题结构法 (PSM)、超对策 (Hypergame)、亚对策 (Metagame)、战略选择发展与分析 (SODA)、生存系统模型 (VSM)、对话式计划 (IP)、批判式系统启发 (CSH) 等。另一个趋势是与优化有关的, 即软计算。这种方法不追求严格最优, 具有启发式思路, 并借用来自生物学、物理学和其他学科的思想来寻求优化, 其中最著名的有遗传算法 (GA)、模拟退火算法 (SA)、神经网络算法 (NN)、模糊逻辑 (FL)、进化计算 (EC)、禁忌算法 (TS)、蚁群优化 (ACO) 等。此外, 在一些经典运筹学分支中也出现了新的发展, 如适合解决大型线性规划问题的内点法, 图论中出现的无标度网络 (scale free network) 等。

进入 21 世纪后, 大数据、人工智能、商务分析等学科的兴起使得运筹优化在实际场景的应用面临着巨大挑战。当问题的规模越来越大、问题本身越来越复杂时, 如何在有限时间内开发出效果不错的解决方案变得越来越重要。与之相应的, 渐进最优 (asymptotically optimal)、近似动态规划 (approximation dynamic programming)、鲁棒优化 (robust optimization) 等方法得到了学者的广泛关注, 并取得了一大批研究成果。在基于大数据的商务分析中, 往往需要将数据分析技术 (比如深度学习和强化学习) 和运筹优化技术结合起来, 基于学习的运筹优化已成为当前运筹学研究的前沿问题。

总之, 运筹学还在不断发展中, 新的思想、观点和方法不断涌现。本书作为一本教材, 所提供的一些运筹学思想和方法都是基础的, 是学习运筹学的读者必须掌握的知识。

习 题

- 1.1 简要说明 20 世纪 50 年代后运筹学取得较快发展的主要原因。
- 1.2 简要说明运筹学工作在企业经营管理决策中的地位和作用。
- 1.3 为什么说建立相应模型是运筹学工作步骤中最重要的部分?
- 1.4 如何理解运筹学解决问题的目标从追求“最优”向“满意”的转变?



即测即练